

PCB 地线的干扰与抑制分析

摘要：在 PCB 设计中，尤其是在高频电路中，经常会遇到由于地线干扰而引起的一些不规律、不正常的现象。本文对地线产生干扰的原因进行分析，详细介绍了地线产生干扰的三种类型，并根据实际应用中的经验提出了解决措施。这些抗干扰方法在实际应用中取得了良好的效果，使一些系统在现场成功运行。

在单片机系统中，PCB（印制电路板）是用来支撑电路元件，并提供电路元件和器件之间电气连接的重要组件，PCB 导线多为铜线，铜自身的物理特性也导致其在导电过程中必然存在一定的阻抗，导线中的电感成分会影响电压信号的传输，电阻成分则会影响电流信号的传输，在高频线路中电感的影响尤为严重，因此，在 PCB 设计中必须注意和消除地线阻抗所带来的影响。

1 产生干扰的原因

电阻与阻抗两个不同的概念。电阻指的是在直流状态下导线对电流呈现的阻抗，而阻抗指的是交流状态下导线对电流的阻抗，这个阻抗主要是由导线的电感引起的。由于地线总是存在阻抗，因此用万用表测量地线时，地线的电阻一般是 $\text{mm}\Omega$ 级。

以 PCB 上一段长 10 cm、宽 1.5 mm，厚度为 $50\mu\text{m}$ 的导线为例，通过计算可得到其阻抗的大小。 $R=\rho L/s$ (Ω)，式中 L 为导线长度 (m)， s 为导线截面积 (mm^2)， ρ 为电阻率 $\rho=0.02$ ，因此该导线电阻值约为 0.026Ω 。

当一段导线与其他导线远离并且其长度远大于宽度时，导线的自感量为 $0.8\mu\text{H}/\text{m}$ ，那么 10 cm 长的导线的电感量是 $0.08\mu\text{H}$ 。再由下面的公式求出导线感抗： $X_L=2\pi fL$ ，下式中， f 为导线通过信号的频率 (Hz)， L 为单位长度导线的自感量 (H)。所以分别计算出该导线在低频和高频下的感抗值：

$$f=10\text{ kHz}; X_L=6.28\times 10\times 10^3\times 0.08\times 10^{-6}\approx 0.005\Omega;$$

$$f=30\text{ MHz}; X_L=6.28\times 30\times 10^6\times 0.08\times 10^{-6}\approx 16\Omega$$

在实际电路中，造成电磁干扰的信号往往是脉冲信号，脉冲信号包含丰富的高频成分，因此会在地线上产生较大的电压。通过以上的公式计算可以看出，在低频信号传输中导线电阻大于导线感抗，对于数字电路，电路的工作频率很高，在高频信号中导线感抗要远大于导线电阻。因此，地线阻抗对数字电路的影响是十分可观的。这就是电流流过小电阻时产生大压降，导致电路工作异常的原因。

2 地线干扰机理

2.1 地环路干扰

地环路干扰是一种较常见的干扰现象，常常发生在通过较长电缆连接并且相距较远的设备之间。地线造成电磁干扰的主要原因是地线存在阻抗，当电流流过地线时，会在地线上产生电压，这就是地线噪声。在这个电压的驱动下，会产生地线环路电流，形成地环路干扰。如图 1 所示是两个接地的电路。



图1 地环路干扰

由于两个设备的地电位不同，形成地电压，在这个电压的驱动下，“设备 1—互联电缆—设备 2—地”形成的环路之间有电流流动。由于电路的不平衡性，每根导线上的电流不同，因此会产生差模电压，对电路造成干扰。

由于地环路干扰是因地环路电流而导致的，因此有时会发现，当把一个设备的地线断开后，干扰现象消失，这是因为地线断开时切断了地环路。这种现象经常发生在低频干扰的场合，当干扰频率较高时，断开地线与否关系不大。

2.2 公共阻抗干扰

在数字电路中，由于信号的频率较高，地线往往呈现较大的阻抗。这时，当几个电路共用一段地线时，由于地线的阻抗，一个电路的地电位会受另一个电路工作电流的调制，这样一个电路中的信号会耦合进另一个电路，这种耦合称为公共阻抗耦合。

解决公共阻抗耦合的方法是减小公共地线部分的阻抗，或采用单点接地，彻底消除公共阻抗图 2 的例子说明了一种干扰现象。图 2 是一个有四个门电路组成的简单电路。假设门 1 的输出电平由高变为低，这时电路中的寄生电容（有时门 2 的输入端有滤波电容）会通过门 1 向地线放电，由于地线的阻抗，放电电流会在地线上产生尖峰电压，如果这时门 3 的输出是低电平，则这个尖峰电压就会传到门 3 的输出端，门 4 的输入端，如果这个尖峰电压的幅度超过门 4 的噪声门限，就会造成门 4 的误动作。

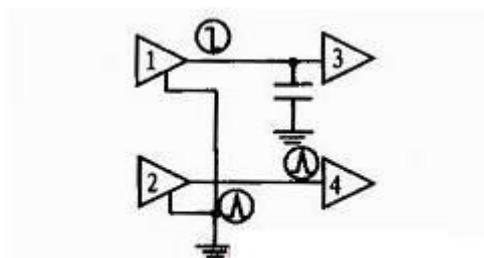


图2 地线阻抗造成的电脑误操作

2. 3 地环路电磁耦合干扰

图 1 所示的“地线环路”将包围一定的面积，根据电磁感应定律，如果这个环路所包围的面积中有变化的磁场存在，就会在环路中产生感生电流，形成干扰。空间磁场的变化无处不在，于是包围的面积越大干扰就越严重。

3 解决地线干扰的方法

3. 1 解决地环路干扰

解决地环路干扰的基本思路有 3 个：一个是减小地线的阻抗，从而减小干扰电压，但是这对第二种原因导致的地环路干扰没有效果。第二个方法是改变接地结构，将一个机箱的地线连接到另一个机箱上，通过另一个机箱接地，这就是单点接地的概念。第三个是增加地环路的阻抗，从而减小地环路电流。当阻抗无限大时，实际是将地环路切断，即消除了地环路。因此提出以下几种解决地环路干扰的方案。

1) 将一侧的设备浮地

如果将一侧电路浮地，就切断了地环路，因此可以消除地环路电流。但有两个问题需要注意，一个是出于安全的考虑，不允许电路浮地。这时可以考虑将设备通过一个电感接地。这样对于 50 Hz 的交流电流设备接地阻抗很小，而对于频率较高的干扰信号，设备接地阻抗较大，减小了地环路电流。但这样做只能减小高频干扰的地环路干扰。另一个问题是，尽管设备浮地，但设备与地之间还是有寄生电容，这个电容在频率较高时会提供较低的阻抗，因此并不能有效地减小高频地环路电流。

2) 使用变压器

解决地环路干扰的最基本方法是切断地环路。用隔离变压器就起到这个作用，两个设备之间的信号传输通过磁场耦合进行，而避免了电气直接连接。这时地线上的干扰电压出现在变压器的初次级之间，而不是在电路的输入端。提高变压器高频隔离效果的一个办法是在变压器的初次级之间设置屏蔽层。但一定要注意隔离变压器屏蔽层的接地端必须在接受电路一端。否则，不仅不能改善高频隔离效果，还可能使高频耦合更加严重。因此，变压器要安装在信号接收设备的一侧。

变压器隔离的方法有一些缺点，不能传输直流，体积大，成本高。由于变压器的初次级之间有寄生电容，因此高频时的隔离效果不是很好。

3) 使用光隔离元件

用光传输信号是解决地环路问题的理想方法。如图 3 所示，光耦器件的寄生电容为 2 pF 左右，因此能够在很高的频率起到隔离作用。如果使用光纤，则没有寄生电容的问题，能够获得十分完善的隔离效果。但是，用光纤会带来其它问题，如：需要更大的功率、需要更多的外围器件，光连接的线形和动态范围都达不到模拟信号的要求、光缆的安装和维护比较复杂等，使用时应注意。

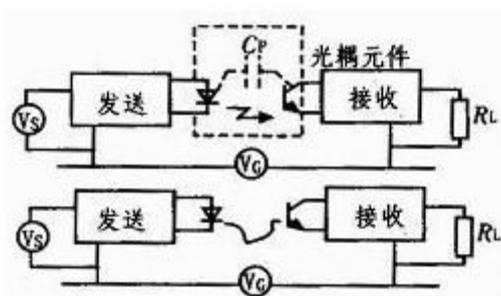


图3 使用光隔离元件

4) 使用共模扼流圈

地线电压实际是一种共模电压，在这个电压的驱动下，电缆中流过的电流是共模电流。在连接电缆上使用共模扼流圈相当于增加了地环路的阻抗，这样在一定的地线电压作用下，地环路电流会减小。但要注意控制共模扼流圈的寄生电容，否则对高频干扰的隔离效果很差。共模扼流圈的匝数越多，则寄生电容越大，高频隔离的效果越差。

5) 平衡电路对地环路干扰的抑制

平衡电路的定义是两个导体及其所连接的电路相对于地线或其他参考物体具有相同的阻抗。

高频时平衡是很困难的，实际的电路会有很多寄生因素，如寄生电容、电感等。这些参数在频率较高时对电路阻抗发挥着较大作用。由于这些寄生参数的不确定性，电路的阻抗也是不确定的，因此很难保证两个导体的阻抗完全相同。因此，在高频时，电路平衡性往往较差，这意味着：平衡电路对频率较高的地环路电流干扰抑制效果较差。

3. 2 消除公共阻抗耦合

消除公共阻抗耦合的途径有两个，一个是减小公共地线部分的阻抗，这样公共地线上的电压也随之减小，从而控制公共阻抗耦合。另一个方法是通过适当的接地方式避免容易相互干扰的电路共用地线，一般要避免强电路与弱电电路共用地线，数字电路与模拟电路共用地线等。并联接地的缺点是接地的导线过多。因此在实际中，没有必要所有电路都并联单点接地，对于相互干扰较少的电路，可以采用串联单点接地。例如，可以将电路按照强信号，弱信号，模拟信号，数字信号等分类，然后在同类电路内部用串联单点接地，如图4所示，不同类型的电路采用并联单点接地，如图5所示。当信号频率低于1 MHz时可采用单点接地的方法，使其不形成回路。信号频率高于10 MHz时最好采用多点接地，尽量降

低地线阻抗。电源线与地线应尽量靠近走线以减少所包围的环路面积，从而减少外界磁场对环路切割产生的电场干扰，同时也减少环路对外电磁辐射。

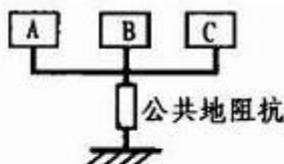


图4 串联单点接地



图5 并联单点接地

如前所述，减小地线阻抗的核心问题是减小地线的电感。可以使用扁平导体做地线，或用多条相距较远的并联导体作接地线。对于 PCB，在双层板上布地线网格能够有效地减小地线阻抗，在多层板中可以专门用一层做地线来减小阻抗。

4 结论

抗干扰设计是单片机系统设计的重要环节，其设计的好坏往往决定整个系统的成败。关于接地，许多关于电磁兼容的专著中都有详细的论述，但是，最好的接地方式应该是通过试验来选定的，地线干扰也要通过试验来查找和排除。本文介绍了地线引起干扰的原因和解决方法，说明了地线设计中的一般方法和原则，只有在理论的指导下，经过大量的试验过程和经验积累才能更好地掌握接地系统的设计方法和干扰排除手段，从而更好的提高电路工作的可靠性。